

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Базовая кафедра фотоники и лазерных технологий

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий баз.каф. ФилТТ
_____ А.Н. Втюрин
« _____ » _____ 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**Лазерное термоупрочнение твердосплавных композитов на основе карбида
вольфрама**

16.04.01 Техническая физика

16.04.01.02 Оптическая физика и квантовая электроника

Научный руководитель	_____	доцент, канд. техн. наук	Н. Э. Лямкина
Выпускник	_____		А. А. Шефер
Рецензент	_____	ст.науч.сотр., канд. физ.-мат. наук	А. С. Крылов

Красноярск 2020

РЕФЕРАТ

Тема магистерской диссертации «Лазерное термоупрочнение твердосплавных композитов на основе карбида вольфрама». Работа содержит 32 страницы текстового документа, 11 иллюстраций, 6 таблиц, 8 ссылок на использованные литературные источники.

ТВЕРДОСПЛАВНЫЕ КОМПОЗИТЫ, КАРБИД ВОЛЬФРАМА, ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОУПРОЧНЕНИЕ, РЕЖИМ ОБРАБОТКИ, МИКРОТВЕРДОСТЬ.

Цель работы: выбор оптимального режима лазерного термоупрочнения поверхности твердосплавных композитов на основе карбида вольфрама, изготовленных методом порошковой металлургии и модифицированных ультрадисперсными добавками.

В качестве метода термоупрочнения был выбран метод лазерной обработки поверхности образцов твердосплавных композитов на основе карбида вольфрама. Лазерное излучение характеризуется гигантской концентрацией энергии, обеспечивающей значительную интенсификацию процессов обработки материалов. Тепловое воздействие при лазерной технологии регулируется в широких пределах за счет изменения параметров излучения и режимов обработки. Это обеспечивает изменение скорости нагрева и охлаждения, времени пребывания материала при высоких температурах, что позволяет получать требуемую структуру и улучшать механические свойства поверхности обрабатываемых изделий. К технологическим достоинствам лазерной поверхностной обработки относят локальность и бесконтактность нагрева, отсутствие короблений, высокую скорость и производительность процесса, возможность дистанционной обработки в труднодоступных местах.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Твердосплавные композиты на основе карбида вольфрама.....	6
1.1 Физико-механические свойства карбида вольфрама	6
1.2 Твердые сплавы на основе карбидов металлов.....	8
1.3 Твердосплавные композиты, модифицированные ультрадисперсными добавками.....	12
2 Лазерная термическая обработка	15
2.1 Механизмы термоупрочнения материалов.....	16
2.2 Взаимодействие лазерного излучения с веществом.....	17
3 Методы измерения микротвердости	19
4 Лазерное термоупрочнение образцов твердосплавных композитов на основе карбида вольфрама.....	24
4.1 Лазерный гравёр BODOR BCL-BSM	24
4.2 Режимы лазерной обработки	26
4.3 Термоупрочнение образцов, модифицированных УДП Al_2O_3 и Cu.....	26
4.4 Термоупрочнение образца, модифицированного УДП Al	30
Заключение	31
Список использованных источников	32

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день особое внимание привлекает вопрос повышения производительности труда, технический прогресс, а также экономия средств и материалов. В числе прогрессивных технологических направлений, обуславливающих и обеспечивающих научно-технический прогресс металлообработки, одно из первых мест занимают методы электрофизической обработки материалов, с каждым годом все более широко используемые в промышленности и дающие большой экономический эффект. К методам электрофизической обработки относят различные по схемному и аппаратному оформлению и назначению методы обработки, основанные на использовании электрической энергии или специфических физических явлений, создаваемых этой энергией, для удаления материала, нанесения защитных покрытий или модификации поверхностного слоя. В инструментальном производстве электрофизические методы обработки применяются в области упрочнения режущего инструмента с целью повышения его эксплуатационных характеристик. Быстрое разрушение изделий, работающих при высоких скоростях, нагрузках и температурах, к каковым относится режущий инструмент, требует разработки и внедрения в производство новых методов упрочнения.

К традиционным способам повышения стойкости относится как поверхностная термообработка, так и различные диффузионные и другие химико-термические способы обработки, нанесение покрытий, наплавка и другие способы.

Наиболее широкое применение указанные способы получили для повышения износостойкости твердосплавного инструмента. Твердые сплавы, как инструментальные материалы широко и эффективно применяются в металлообработке. Однако качественные изменения в металлообработке (появление новых труднообрабатываемых материалов, применение станков с ЧПУ, многоцелевых станков и т.д.) повышает требования к работоспособности и надежности твердосплавного инструмента. Поэтому необходимо не только создавать новые

твердые сплавы с заданными свойствами, но и улучшать качество наиболее распространенных твердых сплавов.

Очевидно, что на данном этапе развития промышленности упрочнение твердых сплавов является актуальным и экономически обоснованным вопросом, решение которого обеспечит снижение потерь от износа и увеличит ресурс работы инструмента.

Цель настоящей работы: выбор оптимального режима лазерного термоупрочнения поверхности твердосплавных композитов на основе карбида вольфрама, изготовленных методом порошковой металлургии и модифицированных ультрадисперсными добавками.

Твердосплавные образцы на основе карбида вольфрама были предоставлены кафедрой «Конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств» Политехнического института СФУ. Образцы были изготовлены методом порошковой металлургии. В качестве дисперсно-упрочняющих добавок к карбиду вольфрама WC8 использовались ультрадисперсные порошки алюминия Al, Cu и оксида алюминия Al_2O_3 . Включение в состав твердосплавных композитов ультрадисперсных добавок улучшает их механические свойства, повышает износостойкость и твердость изделий.

1 Твердосплавные композиты на основе карбида вольфрама

1.1 Физико-механические свойства карбида вольфрама

Карбид вольфрама (монокарбид вольфрама) — химическое соединение углерода и вольфрама с формулой WC , с массовой долей первого элемента 6,1%.

Вольфрамовые карбиды подразделяются на две разновидности – монокарбид WC и полукарбид W_2C . Первый в сравнении с полукарбидом отличается меньшей устойчивостью и твердостью, зато, в противоположность W_2C , он образует кристаллы в расплавленном вольфраме (рисунок 1).

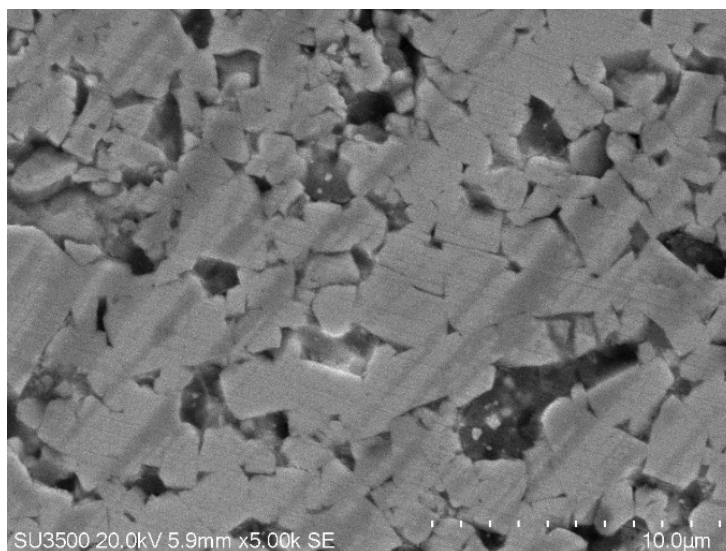


Рисунок 1 – Микрограмма кристаллов WC

Монокарбид вольфрама имеет две кристаллографические модификации: α - WC с гексагональной решеткой (периоды решетки $a = 0,2906$ нм, $c = 0,2839$ нм), и β - WC с кубической гранецентрированной решеткой ($a = 0,4220$ нм), которая устойчива свыше 2525 °С. При этом в интервале температур 2525 – 2755 °С существуют обе фазы.

К важнейшим технологическим свойствам вольфрамовых карбидов относят высокие значения их твердости (в т.ч. при повышенных температурах), износостойкости и тугоплавкости, обусловленные прочностью межатомных связей в кристаллах WC/W_2C . Их, как и карбиды иных твердых металлов, характеризуют также металлическая проводимость и положительный коэффициент электросопротивления.

В отличие от монокарбида WC , полукарбид W_2C является более термостойким, а также может легко внедряться в твёрдые растворы WC с другими металлами – железом, кобальтом и др. Помимо, этого, к полезным свойствам полукарбида вольфрама можно причислить исключительную износостойкость. Для промышленного применения актуально каждое из данных химических соединений.

Физико-механические характеристики карбидов вольфрама определяются степенью их дисперсности, химической чистотой, а также способом получения, который, в свою очередь, зависит от области будущего применения.

Ниже приведены основные физико-механические свойства 98% -ного монокарбида вольфрама:

- а) предел прочности на изгиб, МПа, не ниже – 1000;
- б) предел прочности на сжатие, МПа, не ниже – 9500;
- в) модуль упругости, ГПа – 69;
- г) ударная вязкость, $кГм/см^2$ – 1,2...1,3;
- д) твёрдость по Роквеллу, HRA, не ниже — 90;
- е) плотность, $г/см^3$ – 15,0...15,5;
- ж) температуру плавления 2870°C;
- з) темп кипения — 6000°C;
- и) теплопроводность: $\lambda = 197$ Вт/м·К;
- к) удельная теплоемкость: $C = 184$ Дж/кг·К.

Несмотря на то, что температура плавления большая, термостойкость рассматриваемого материала низка. Это обусловлено отсутствием термического расширения ввиду жесткой структуры. При этом карбид вольфрама характери-

зуется высокой теплопроводностью ($84 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$) (для сравнения, твердые сплавы значительно превосходят по этому параметру углеродистую сталь ($38 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$) и быстрорежущую сталь ($25 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$)). С повышением температуры данный параметр у монокарбида возрастает вдвое быстрее, чем у полукарбида.

Таким образом, в сравнении с наиболее прочными сталями карбид вольфрама обладает значительно более высокими прочностными показателями, но, с другой стороны, он и более хрупок, а также отличается пониженной обрабатываемостью. Поэтому в порошковой металлургии прямое использование твердых металлов и их карбидов для непосредственного изготовления деталей (в т.ч. металлорежущего инструмента) весьма ограничено. Для этой цели применяют, главным образом, их сплавы (спеченные и литые твердые сплавы) с более мягкими и пластичными металлическими компонентами, образующими демпфирующую связующую среду. В качестве такого связующего компонента в сплавах на вольфрамокарбидной основе обычно выступает кобальт (Co), не оказывающий на карбиды разрушительного воздействия и, что немаловажно, не образующий своих карбидов. Получили применение и более сложные сочетания, с карбидами титана и тантала. Тем не менее, составляющая карбида вольфрама во всех этих случаях остаётся преобладающей: от 98 до 70%.

1.2 Твердые сплавы на основе карбидов металлов

Твердые сплавы обладают набором свойств, присущих одновременно всем входящим в их состав компонентам, что значительно расширяет сферу практического применения подобных композитных материалов.

Обозначения марок сплавов построено по следующему принципу: сплавы, содержащие карбид вольфрама и кобальт, обозначаются буквами ВК (вольфрам-кобальт), после которых цифрами указывается процентное содержание в сплаве кобальта Co. Физико-механические свойства сплавов ВК определяются размерными параметрами карбидных зерен, содержанием Co (от 1,5 до

32 %) в общей массе и технологическими различиями производственных процессов спекания и литья. Укрупнение карбидовольфрамowych зерен делает сплав более вязким и одновременно влечет за собой повышение твердости. При повышении концентрации Со улучшаются прочностно-режущие характеристики, однако ухудшаются прочность и стойкость к износу. Вот почему сплавы с невысокой концентрацией Со (BK2, BK3, BK4), характеризующиеся относительно малыми значениями жесткости и устойчивости к износу. Ввиду невысокой прочности их целесообразно применять при изготовлении инструмента, предназначенного для чистовой обработки поверхностей.

По способу изготовления твердые сплавы подразделяют на 2 категории: спеченные, изготавливаемые методом спекания карбидных порошков WC, TiC, TaC с металлическим связующим в виде Со (ГОСТ 3882-74); литые, получаемые в результате плавки и последующего формовочного прессования прутков (ГОСТ 21449-75). Продукция, изготавливаемая из спеченных сплавов, не поддается механической обработке (за исключением шлифования алмазными кругами). Обработка возможна с использованием физико-химического (кислотное травление), лазерного и ультразвукового методов.

Все разновидности литых твердых сплавов используют для наплавления на рабочие кромки режущего и горно-бурового оборудования, а также с целью нанесения защитно-упрочняющих покрытий на металлические поверхности. Они могут обрабатываться как механическими, так и термоспособами (закалки, отжига, старения и т.д.).

К категории спеченных твердых металлокерамических сплавов, или керметов причисляют линейку композитных материалов (твердых растворов), получаемых методом формопрессования с последующим спеканием в вакуумно-водородных средах при 1550-2100 °С карбидных порошковых компонентов (вольфрамо- или титанокарбидов, а также сложных карбидов W, Ti и Ta, реже — иных карбидов, боридов и т. п.) с демпфирующим матричным связующим, в качестве которого используют более мягкие и пластичные металлы/сплавы. Обычно в роли такого связующего компонента выступает Со, не вступающий в

реакцию с С и не образующий собственных карбидов; иногда — Ni либо сплав Ni-Mo.

Наиболее востребованные марки спеченных твердых сплавов (СТС) с указанием их основных промышленно-значимых свойств перечислены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные марки СТС и их свойства

Марки сплавов	WC %	TiC %	TaC %	Co %	Предел прочности на изгиб (σ), МПа	Значения твердости, HRA	Значения плотности (ρ), г/см ³	Значения теплопроводности (λ), Вт/(м·°C)	Значения модуля Юнга (E), ГПа
BK2	98	-	-	2	1210	91,55	15,11	51,1	645,1
BK3	97	-	-	3	1210	89,55	15,31	50,21	643,3
BK3-M	97	-	-	4	1560	91,05	15,31	50,22	638,02
BK4	96	-	-	4	1510	89,52	14,8-15,3	50,31	637,61
BK4-B	96	-	-	4	1560	88,1	15,3	50,71	628,04
BK6	94	-	-	6	1540	88,57	15,1	62,82	633,01
BK6-M	94	-	-	6	1460	90,25	15	67,02	632,01
BK6-OM	94	-	2	6	1320	90,51	15,1	69,01	632,02
BK8	92	-	-	8	1710	87,51	14,7	50,24	598,03
BK8-B	92	-	-	8	1760	89,06	14,8	50,41	598,52
BK10	90	-	-	10	1820	87,12	14,7	67,05	574,21
BK10-OM	90	-	-	10	1510	88,53	14,7	70,01	574,11
BK15	85	-	-	15	1920	86,22	14,2	74,04	559,03
BK20	80	-	-	20	2100	84,54	13,9	81,02	546,01
BK25	75	-	-	25	2160	83,03	13,2	83,06	540,02
BK30	70	-	-	30	2450	81,51	12,6	85,01	533,11
T5K10	85	6	-	12	1460	88,51	13,2	20,93	549,21
T5K12	83	5	-	12	1720	87,01	13,6	21,04	549,33
T14K8	78	14	-	8	1310	89,53	11,7	16,77	520,02
T15K6	79	15	-	6	1220	90,17	11,6	12,165	522,06
T30K4	66	30	-	4	1050	92,12	9,9	12,58	422,04
TT7K12	81	4	3	12	1730	87,21	13,4		
TT8K6	84	8	2	6	1360	90,52	13,4		
TT10K8-B	82	3	7	8	1660	89,33	13,9		
TT20K9	67	9,4	14,1	9,5	1510	91,06	12,6		
TH-20	-	79	Ni 15%	Mo 6%	1050	89,55	5,9		
TH-30	-	69	Ni 23%	Mo 29%	1120	88,54	6,1		

Твердые сплавы, применяемые для обработки металлов резанием: ВК6, ВК3М, ВК6М, ВК60М, ВК8, ВК10ХОМ, Т3ОК4, Т15К6, Т14К8, Т5К10, ТТ7К12, ТТ20К9.

Твердые сплавы, применяемые для бесстружковой обработки металлов и древесины, быстроизнашивающихся деталей машин, приборов и приспособлений: ВК3, ВК3М, ВК6, ВК6М, ВК8, ВК15, ВК20, ВК10КС, ВК20КС.

Твердые сплавы, применяемые для оснащения горного инструмента: ВК6В, ВК4В, ВК8ВК, ВК8, ВК10КС, ВК8В, ВК11ВК, ВК15.

Литые твёрдые сплавы (ЛТС), именуемые также наплавочными, производят плавлением-литьевым способом. Конечная продукция может иметь вид либо специальных наплавочных.

Способность твердых сплавов (ТС) к сохранению изначально высокой твердости и сопротивляемости деформационным воздействиям в высокотемпературном режиме, в сочетании с приемлемыми прочностными характеристиками, – их неоспоримое преимущество перед линейками всех прочих инструментальных материалов.

Основными сферами практического применения ТС являются: создание резцов, фрез, сверл, протяжек, зенкеров, разверток и другого инструментария для механической обработки различных конструкционных материалов способами резания; изготовление штампов, матриц, пуансонов, мундштучных фильер, протяжек и т.п. изделий, применяемых для обработки материалов давлением; обустройство рабочих поверхностей аппаратуры для микрометрии и взвешивания, прочих высокоточного измерительно-дозировочных инструментов и приспособлений; оснащение рабочих элементов устройств для нанесения клеев; оснащение функциональных частей волочильного оборудования; изготовление породоразрушающих элементов оборудования для добывающей и дорожно-строительной отраслей (буровые головки, шарошки, долота и т.д.) с применением металлокерамических вставок из спеченных твердых сплавов (СТС) или наплавляемых покрытий из ЛТС; изготовление элементов подшип-

ников качения (шариков, роликов, обойм); порошковое СТС-напыление или ЛТС-наплавление износостойких покрытий.



Рисунок 2 – Внешние токарные инструменты

Твердые сплавы в настоящее время являются распространенным инструментальным материалом, широко применяемым в инструментальной промышленности. За счет наличия в структуре тугоплавких карбидов твердосплавный инструмент обладает высокой твердостью, теплостойкостью (800—1000 °С), поэтому ими можно работать со скоростями, в несколько раз превышающими скорости резания для быстрорежущих сталей. Однако, в отличие от быстрорежущих сталей, твердые сплавы имеют пониженную прочность, не обладают ударной вязкостью.

1.3 Твердосплавные композиты на основе карбида вольфрама, модифицированные ультрадисперсными добавками

Одним из перспективных направлений повышения качества твердых сплавов и изделий на их основе является формирование субмикронной структуры с зёрнами твердой карбидной фазы размером 300–400 нм. Задачи повышения качества твердых сплавов могут быть эффективно решены путем ис-

пользования наноразмерных порошков карбида вольфрама либо введения ультрадисперсных или нанопорошков оксидов, нитридов, наноразмерных порошков карбидов ванадия, хрома, тантала или других которые играют роль ингибиторов роста зерна основной фазы WC при спекании [3].

Авторами [4] были установлены стабильные корреляционные связи между объемным содержанием добавок ультрадисперсных порошков (УДП) и средним размером карбидов, параметрами микроструктуры и прочностью твердых сплавов. Ультрадисперсные порошки Al_2O_3 , имеющие средний размер частиц 0,1 мкм, введенные в состав твердого сплава, способствуют уменьшению толщины металлической прослойки, и, как результат, обеспечивается увеличение прочности связующего и твердосплавного композита в целом. Модифицирование УДП способствует снижению среднего размера зерна карбидной фазы и повышению основных конечных физико-механических свойств твердых сплавов.

Включения тугоплавких и твердых ультрадисперсных и наночастиц в прослойках связки позволяют повысить стойкость к износу при повышенных температурах, например, при высокоскоростном резании, и, кроме того, являются барьерами на пути распространения микротрещин, повышается прочность инструмента. Так применение разработанных авторами [4] составов твердых сплавов, включающих частицы УДП Al_2O_3 в количестве 0,05-0,2 % по массе, позволило добиться увеличения (по сравнению со стандартными материалами) прочности на изгиб на 25–30 %; трещиностойкости на 50 %; износостойкости (стойкость к истиранию) в 2–2,5-раза. За счет наличия в структуре твердого сплава УДП оксида алюминия повышается стойкость режущего инструмента в 1,3 – 1,8 раза по сравнению с исходным сплавом.

В настоящей работе изучается воздействие лазерного излучения на образцы твердого сплава на основе карбида вольфрама, полученных методом порошковой металлургии. Образцы предоставлены кафедрой «Конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств» Политехнического института СФУ. Размеры образцов: диаметр ~ 5мм, 10мм, 16мм, тол-

щина – от 2 до 4мм. Образцы различаются по своему составу. Они модифицированы ультрадисперсными добавками, в качестве которых используют порошки алюминия Al (1% масс), Cu (1% масс), оксида алюминия Al_2O_3 (0,3% масс). Эти УДП добавки препятствуют разрастанию зерна в процессе спекания образца. На рисунке 3 представлен один из образцов композита полученный с добавлением в состав меди.



Рисунок 3 – Образец твердого сплава на основе карбида вольфрама с включением меди в состав композита

2 Лазерная термическая обработка

Одним из широко применяемых видов поверхностной лазерной обработки металлов и сплавов является лазерная термообработка. Она основана на локальном нагреве участка поверхности под воздействием излучения и последующем охлаждении этого участка со сверхкритической скоростью за счет теплоотвода во внутренние слои металла или сплава после прекращения воздействия лазерного излучения. При этом изменяются фазовое состояние и структура сплавов и, как следствие, в широких пределах изменяются их физические и механические свойства. Скорость нагрева составляет $10^5 - 10^6$ град/с, скорость охлаждения – $10^4 - 10^7$ град/с.

Энергетические параметры лазерного воздействия (плотность мощности E , длительность τ воздействия, коэффициент $A_{\text{эф}}$ поглощения лазерного излучения поверхностью) и физические свойства обрабатываемого материала (коэффициент температуропроводности, коэффициент диффузии в твердой фазе и др.) определяют тепловые и диффузионные процессы, приводящие к тем или иным структурным изменениям и фазовым превращениям. В зависимости от степени теплового влияния на приповерхностные слои лазерное упрочнение подразделяется на отжиг, гомогенизацию, отпуск, лазерную закалку, перекристаллизацию (оплавление поверхности), высокоскоростную перекристаллизацию.

Наиболее полно преимущества лазерной термообработки проявляются при режимах закалки (термоупрочнения) без нарушения исходной чистоты поверхности и геометрии детали.

При поверхностной закалке на некоторую (заданную) глубину закаливается только поверхностный слой, тогда как сердцевина изделия остается незакаленной. Основное назначение поверхностного лазерного термоупрочнения – повышение износостойкости поверхностей деталей, подвергающихся наибольшему изнашиванию.

Лазерное термоупрочнение имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами упрочнения (например, закалкой токами высокой частоты, пламенем газовой горелки):

- локальность воздействия;
- минимальные деформации детали;
- высокая концентрация энергии;
- отсутствие контакта с обрабатываемым изделием;
- возможность обработки труднодоступных мест;
- высокая степень автоматизации.

Приведенные достоинства указывают на то, что лазерное термоупрочнение достаточно перспективно в современном машиностроении.

2.1 Механизмы термоупрочнения материалов

Под упрочнением материала понимают повышение его сопротивления пластической деформации и разрушению под действием внешних нагрузок. Пластическая деформация обычно связана с движением двумерных структурных дефектов – дислокаций, поэтому физическое понимание упрочнения заключается в затруднении перемещения дислокаций.

Рассматривают следующие механизмы упрочнения.

1 *Решеточное упрочнение.* Металлы с кристаллическими решетками разного типа по – разному сопротивляются движению дислокаций (имеют различное напряжение "решеточного трения"). Если чистое железо (объемно-центрированная кристаллическая решетка) деформируется относительно легко, то чистый титан (гексагональная решетка) поддается деформации хуже.

2 *Твердорастворное упрочнение.* Это упрочнение веществ, находящихся в твердых растворах, примесями и легирующими элементами, которые искажают кристаллическую решетку, повышая тем самым напряжение трения.

3 *Дислокационное упрочнение.* Перемещающиеся дислокации испытывают сдерживающее воздействие со стороны других дислокаций, находящихся в

материале.

4. *Зернограничное упрочнение.* Сдерживают перемещение дислокаций и границы зерен и субзерен. Чем мельче зерна, тем сила сдерживания больше.

5. *Дисперсионное упрочнение.* Частицы других фаз, выделившиеся при распаде пересыщенных твердых растворов, оказывают значительное сопротивление движению дислокаций.

При лазерной обработке реализуются в той или иной степени все указанные механизмы упрочнения.

2.2 Взаимодействие лазерного излучения с веществом

Характер и эффективность воздействия лазерного излучения на вещество определяется плотностью мощности или интенсивностью излучения. В любом случае лазерного теплового воздействия на материалы важна не просто мощность лазерного излучения, а мощность, поглощенная материалом и идущая на получение полезного результата.

На первой стадии теплового воздействия лазерного излучения на материал, фазовое состояние твердого тела не успевает измениться. Основные явления в этом случае заключаются в отражении и поглощении излучения поверхностью, нагревании поверхности, распространении тепла в глубь среды за счет теплопроводности.

Процесс взаимодействия света с поверхностью твердого непрозрачного тела происходит следующим образом: световая волна, падающая на поверхность, взаимодействует с электронами, возбуждая их колебания. Вынужденные колебания электронов приводят к возникновению отраженной волны. Если электроны в твердом теле полностью свободны, то излучение полностью отражается, поглощение отсутствует. Если электроны частично связаны, то часть энергии падающей волны передается твердому телу, вызывая его нагревание. Весь процесс взаимодействия света с электронами обычно разыгрывается в тонком поверхностном слое, так что часто можно говорить о взаимодействии

света с поверхностью твердого тела. Поглощенная энергия распространяется в веществе за счет различных механизмов теплопроводности.

Коэффициент поглощения веществ зависит от длины волны света. В таблице 2 приведены литературные данные по зависимости коэффициента поглощения от длины волны излучения для разных металлов [6].

Таблица 2 – Коэффициент поглощения различных металлов на длинах волн излучения технологических лазеров

Металл	A(20°C)			
	Ag ⁺ (~500 нм)	Рубин (694,3 нм)	Nd:YAG (~1 мкм)	CO ₂ (10,6 мкм)
Медь	0,56	0,17	0,10	0,015
Алюминий	0,09	0,11	0,08	0,019
Вольфрам	0,55	0,50	0,41	0,026
Олово	0,20	0,18	0,19	0,034
Свинец	0,38	0,35	0,16	0,045
Серебро	0,05	0,04	0,04	0,014

Приведенные значения относятся только к чистым металлическим поверхностям в вакууме. Согласно литературным данным [6], наличие карбидов и оксидов приводит к заметному увеличению поглощения в ИК-области, тогда как в видимой области больших изменений не наблюдается.

Кроме того, из литературы известно, что поглощательная способность веществ возрастает при повышении их температуры. Эмпирическая зависимость степени черноты (коэффициент поглощения) от температуры на длине волны 10,6 мкм, имеет вид

$$\varepsilon(10,6 \text{ мкм}) = 11,2[R(1 + \gamma T)^{1/2}] - 62,9[R(1 + \gamma T)] + 174R(1 + \gamma T)^{3/2}, \quad (1)$$

где R – сопротивление при 20 °C; γ – температурный коэффициент сопротивления, K⁻¹.

3 Методы измерения микротвердости

Одной из наиболее распространенных характеристик, определяющих качество металлов и сплавов, возможность их применения в различных конструкциях и при различных условиях работы, является твердость. Испытания на твердость производятся чаще, чем определение других механических характеристик металлов: прочности, относительного удлинения и др.

Существует несколько способов измерения твердости, различающихся по характеру воздействия наконечника, изготовленного из твердого материала (закаленная сталь, алмаз и др.):

- а) метод вдавливания;
- б) метод отскока;
- в) метод царапания.

Твердость, определенная вдавливанием, характеризует сопротивление металла пластической деформации.

Твердость, определенная по отскоку, характеризует упругие свойства.

Твердость, определенная царапанием, сопротивление разрушению.

В зависимости от скорости приложения нагрузки на индентор твердость различают статическую (нагрузка прикладывается плавно) и динамическую (нагрузка прикладывается ударом).

Широкое распространение испытаний на твердость объясняется рядом их преимуществ перед другими видами испытаний:

- простота измерений, которые не требуют специального образца и могут быть выполнены непосредственно на проверяемых деталях;
- высокая производительность;
- измерение твердости обычно не влечет за собой разрушения детали, и после измерения ее можно использовать по своему назначению;
- возможность ориентировочно оценить по твердости другие характеристики металла, в первую очередь предел прочности.

Выбор формы, размеров наконечника и величины нагрузки зависит от целей испытания, структуры, ожидаемых свойств, состояний поверхности и размеров испытываемого образца.

Измерение микротвердости имеет целью определить плотность отдельных зерен, фаз, структурных составляющих и поверхностных слоев металла при его химико-термической обработке. В этом случае объем, деформируемый вдавливанием, должен быть меньше объема измеряемого зерна, поэтому прикладываемая нагрузка выбирается небольшой.

Значительное влияние на результаты испытаний твердости оказывает состояние поверхности материала. Если поверхность неровная – криволинейная или с выступами – то отдельные участки в различной степени оказывают сопротивление вдавливанию, что приводит к ошибке при измерении твердости.

Поэтому, чем меньше нагрузка, тем тщательнее готовится поверхность. Она должна представлять шлифованную горизонтальную площадку, а для измерения микротвердости и полированную. Измеряемая поверхность должна быть установлена горизонтально, т.е. перпендикулярно действию нагрузки. Противоположная сторона образца должна быть зачищена и не иметь окалины, т.к. последняя при нагружении сминается, что искажает результаты измерения.

Наибольшее применение получило измерение твердости вдавливанием в испытываемый металл индентора в виде шарика, конуса и пирамиды (соответственно методы Бринелля, Роквелла и Виккерса). Измерение твердости этими методами стандартизированы и устанавливаются ГОСТами:

Бринелля – ГОСТ 9012 – 59, Роквелла – ГОСТ 9013 – 59, Виккерса – ГОСТ 2999 – 59. В результате вдавливания достаточно большой нагрузки поверхностные слои металла, находящиеся под наконечником и вблизи него, пластически деформируются. После снятия нагрузки остается отпечаток. Величина внедрения наконечника в поверхность металла будет тем меньше, чем тверже испытываемый материал.

Таким образом, под твердостью понимают способность материала сопротивляться пластической деформации или разрушению при местном силовом

воздействию, возникающего при внедрении в него более твердого тела – индентора [8].

Метод Виккерса

Измерения твердости рассматривают как местные механические испытания поверхностных слоев материала.

При определении твердости по Виккерсу согласно ГОСТ 2999 – 59 в поверхность испытуемого материала вдавливают алмазный индентор в виде наконечника, имеющего форму правильной четырехгранной пирамиды с двугранным углом при вершине в 136° , острие при вершине не более 1 мк (рисунок 4).

Вдавливающая нагрузка выбирается от 50 до 1200 Н в зависимости от твердости и толщины образца или изделия. Продолжительность выдержки под нагрузкой составляет: для черных металлов 10–15 с, для цветных металлов 30–60 с. На рисунке 5 приведен внешний вид микротвердомера ПМТ-3М.

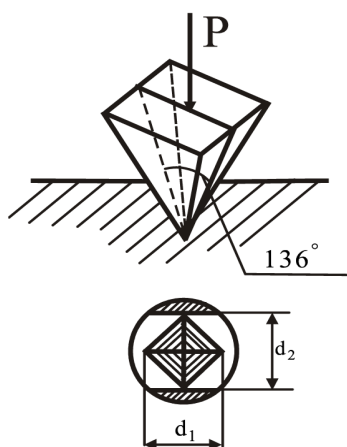


Рисунок 4 – Схема определения твердости по Виккерсу

Метод Виккерса дает высокую точность при измерении твердости тонких слоев, поскольку диагонали отпечатка примерно в 7 раз больше его глубины, поэтому даже при небольшой глубине проникновения пирамиды отпечаток получается достаточно четким.



Рисунок 5 – Микротвердомер ПМТ-3М

При испытании твердых и хрупких слоев (азотированного, цианированного) около углов отпечатка иногда образуются трещины (отколы), по виду которых можно судить о хрупкости измеряемого слоя.

Число твердости по Виккерсу (HV) определяется отношением нагрузки к площади поверхности отпечатка. По диагоналям d_1 и d_2 отпечатка пирамиды и углу α при вершине пирамиды определяют площадь поверхности отпечатка и рассчитывают твердость по формуле (2).

$$HV = 2 \frac{P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 18540 \frac{P}{d^2} \quad (2)$$

где P – нагрузка на пирамиду, г; d – среднеарифметические значения длин обеих диагоналей, мкм.

Микротвёрдость – твёрдость отдельных участков микроструктуры материала – измеряют при вдавливании алмазной пирамиды под нагрузкой менее 2Н. Размеры отпечатка определяют под микроскопом, а затем по (1) или по специальным таблицам пересчитывают на число твёрдости.

Поверхность образцов для определения твердости по Виккерсу необходимо предварительно тщательно отшлифовать наждачной бумагой тонкого номера или отполировать. Толщина исследуемого образца должна быть не меньше, чем 1,5 диагонали отпечатка.

Однако каждое определение по Виккерсу занимает сравнительно много времени и требует тщательной подготовки поверхности образца, что является основным недостатком этого метода, препятствующим широкому применению его в цеховых условиях [8].

4 Лазерное термоупрочнение образцов твердосплавных композитов на основе карбида вольфрама

Лазерному термоупрочнению были подвергнуты три образца твердосплавного композита WC8, модифицированные в процессе изготовления ультрадисперсными добавками (рисунок 6):

образец №1 - WC8+Al₂O₃ (0,3% по массе);

образец №2 - WC8 + УДП Cu (1% по массе);

образец №3 - WC8 + УДП Al (1% по массе).



Образец №1

Образец №2

Образец №3

Рисунок 6 – Образцы твердосплавного композита

Диаметры образцов 5мм, 10мм и 16мм, соответственно.

Для термообработки образцов был выбран технологический CO₂ –лазер, излучающий на длине волны 10,6 мкм.

4.1 Лазерный гравер BODOR BCL-BSM

Термоупрочнение образцов проводилось на лазерном гравере BODOR BCL-BSM. На рисунке 7 приведен внешний вид лазерной установки. В таблице 3 приведены основные технические характеристики гравера.



Рисунок 7 – Лазерный гравер BODOR BCL-BSM

Таблица 3 – Характеристики лазерного гравера BODOR BCL-BSM

Мощность лазерного излучателя	150 Вт
Тип лазерного излучателя	CO ₂
Регулировка мощности	регулируемая от 1 до 100%
Ресурс работы лазерного излучателя	свыше 10 000 часов
Длина волны лазерного излучения	10,6 мкм
Максимальная скорость резки	до 30 000 мм/мин
Точность	10 мкм
Система управления	Сигнальный цифровой процессор DSP

Для точного координатного позиционирования образца на рабочем столе лазерной установки было разработано устройство крепления образца (рисунок 8). Оно выполнено с учётом потребности многократного повторения воздействия лазерного излучения на конкретное место поверхности образца.



Рисунок 8 – Устройство крепления образца

4.2 Режимы лазерной обработки

Температурный режим нагрева материала определяется плотностью мощности излучения лазера. При выборе режимов лазерной обработки опирались на литературные данные, согласно которым при низкой плотности мощности (примерно до $10^3 \div 10^4$ Вт/см²), происходит нагрев материала без его плавления или испарения. С повышением этой величины примерно до $10^6 \div 10^7$ Вт/см² материал плавится, а при плотности мощности излучения, превышающей $10^6 \div 10^7$ Вт/см², материал разрушается вследствие испарения [6]. Скорость сканирования луча, по разным данным, варьируется от 10 до 600 см/мин [5]. Для термоупрочнения, как правило, используют расфокусированный пучок диаметром 0,5 – 1 см [6].

4.3 Термоупрочнение образцов, модифицированных УДП Al_2O_3 и Cu

На первом этапе лазерной термообработке были подвергнуты образец №1 (WC8+ УДП Al_2O_3) образец №2 (WC8 + УДП Cu). Каждый из образцов композита на основе карбида вольфрама был условно разделен на 4 равных сектора и для каждого сектора последовательно были выбраны режимы термоупрочнения. Мощность излучения составляла 150 Вт, диаметр расфокусированного пучка – 0,5 мм (соответственно плотность мощности составила $7,6 \cdot 10^4$ Вт/см²) для всех образцов; 1, 2, 3 и 4 секторов скорость сканирования выбиралась равной 1, 0.5, 0.2 и 0.1 м/мин; число проходов – 5.

Результаты относительного изменения микротвердости образцов №1 и №2 после лазерной термообработки и режимы обработки приведены в таблицах 4 и 5. Микротвердость образца №1 до лазерной термообработки составляла $H_v=4270\pm330$ МПа, образца №2 - $H_v=720\pm140$ МПа.

Таблица 4 – Изменение микротвердости образца №1 (WC8+УДП Al₂O₃) при лазерной термообработке

№ сектора	Мощность излучения, Вт	Плотность мощности, Вт/см ²	Скорость сканирования, м/мин.	Число проходов	H _v = <H _v > ± ΔH _v , МПа	$\frac{H_v^*}{H_v}$
1	150	7,6·10 ⁴	1	5	5560±310	1,3
2	150	7,6·10 ⁴	0,5	5	5740±310	1,34
3	150	7,6·10 ⁴	0,3	5	4660±280	1,09
4	150	7,6·10 ⁴	0,2	5	5140±290	1,2
H_v и H_v^* – микротвердость образцов до и после лазерной термообработки соответственно						

Таблица 5 – Изменение микротвердости образца № 2 (WC8+ УДП Cu) при лазерной термообработке

№ сектора	Мощность излучения, Вт	Плотность мощности, Вт/см ²	Скорость сканирования, м/мин.	Число проходов	H _v = <H _v > ± ΔH _v , МПа	$\frac{H_v^*}{H_v}$
1	150	7,6·10 ⁴	1	5	860±280	1,19
2	150	7,6·10 ⁴	0,5	5	1420±230	1,98
3	150	7,6·10 ⁴	0,3	5	1860±370	2,58
4	150	7,6·10 ⁴	0,2	5	1710±310	2,38
H_v и H_v^* – микротвердость образцов до и после лазерной термообработки соответственно						

Анализируя данные таблиц 4 и 5, видно, что при одинаковой мощности излучения изменение скорости сканирования влияет на изменение микротвердости. Так для образца №1 изменение микротвердости максимально при скорости сканирования луча 0,5 м/ мин (в 1,34 раз), для образца №2 максимальное изменение микротвердости достигнуто при скорости сканирования 0,3 м/ мин. Она увеличилась в 2,58 раз по сравнению с исходной.

Наглядно изменение микротвердости образцов №1 и №2 твердого сплава при разных скоростях движения лазерного луча представлено на диаграммах (рисунки 9, 10).

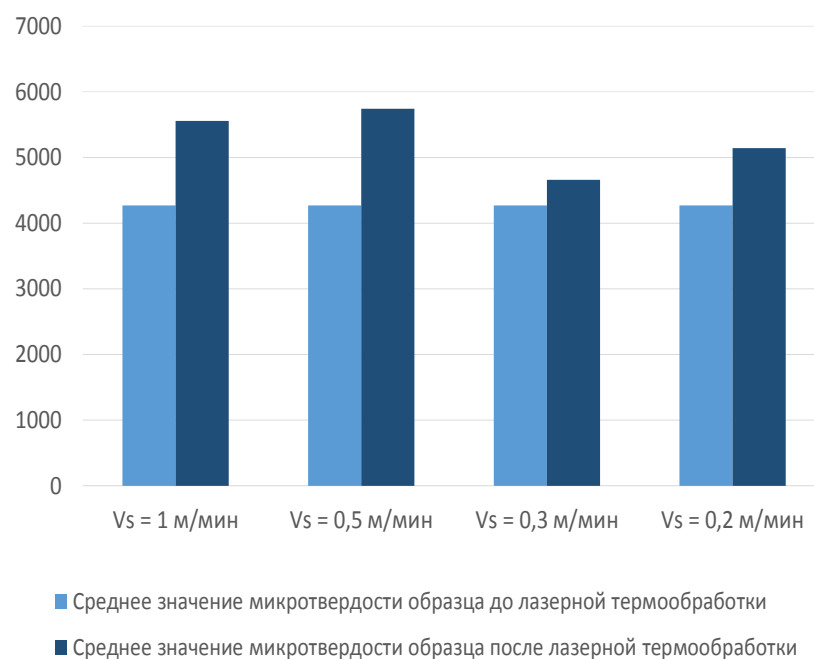


Рисунок 9 – Диаграмма изменения микротвердости образца №1 (WC8+УДП Al₂O₃) при разных скоростях сканирования луча

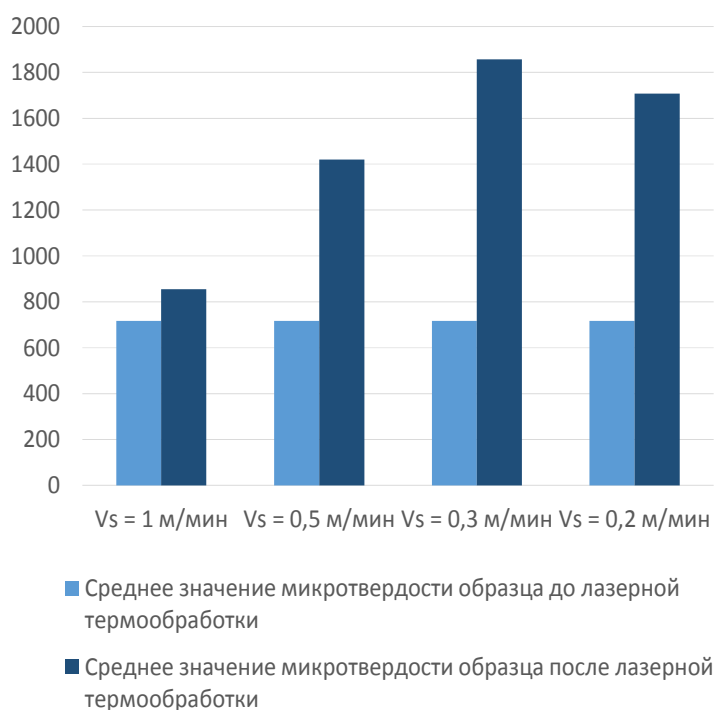


Рисунок 10 – Диаграмма изменения микротвердости образца №2 (WC8 + УДП Cu) при разных скоростях сканирования луча

Тот факт, что микротвердость образцов сначала возрастает при увеличении скорости сканирования, а затем, достигнув максимального значения, уменьшается, по-видимому, связан с механизмом термоупрочнения, реализуемом в данном случае: при лазерной обработке происходит измельчение зерна и увеличение концентрации дефектов кристаллической структуры. Не исключен и механизм упрочнения, связанный с образованием в поверхностном слое карбидов типа W_2C , твердость которых выше чем WC (на 10-14 ГПа).

Увеличение скорости движения теплового источника по поверхности образца увеличивает, соответственно, скорости локального нагрева и охлаждения, что делает закалку более эффективной. Но при скорости сканирования больше некоторой оптимальной термоупрочнение становится менее эффективным. Это связано, по-видимому, с недостаточным нагревом материала в зоне обработки при столь высокой скорости движения луча.

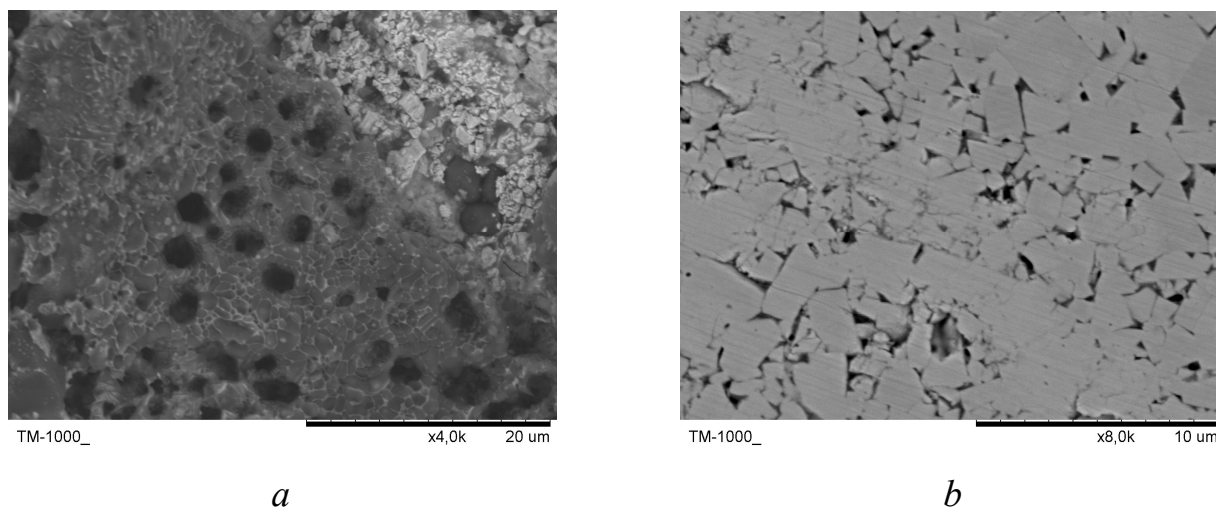


Рисунок 11 – Микрофотография поверхности образца №1 ($WC_8 + \text{УДП } Al_2O_3$)
a) до обработки; *b*) после лазерной термообработки

Изменения в поверхностном слое твердосплавного композита при лазерной обработке наглядно демонстрируют микрофотографии поверхности образца $WC_8 + Al_2O_3$ (рисунок 11). Хорошо видны изменения размеров и состояния границ зерен карбида. Темные участки на фото 2 – это кристаллиты оксида

алюминия, образовавшиеся, вероятно, в результате собирательной рекристаллизации УДП-фазы.

4.4 Термоупрочнение образца, модифицированного УДП Al

При лазерной термообработке образцов №1 и №2 плотность мощности составила $7,6 \cdot 10^4$ Вт/см². На поверхности образцов наблюдались зоны частичного оплавления и появления окалины. Поэтому на следующем этапе работы было принято решение на порядок снизить плотность мощности излучения. При обработке образца №3 (WC8 + УДП Al) твердого сплава были выбраны следующие режимы термоупрочнения: мощность излучения составляла 150 Вт и диаметр расфокусированного пучка – 1,5 мм (соответственно плотность мощности составила $0,8 \cdot 10^4$ Вт/см²); для 1, 2, 3 и 4 секторов скорость сканирования выбиралась равной 0,3, 0,6, 0,9 и 1,2 м/мин; запланированное число проходов – 6. После каждого второго прохода предполагалось измерять микротвердость. Данные по изменению микротвердости образца после двух проходов обработки приведены в таблице 6. Микротвердость образца №3 до лазерной термообработки составляла $H_v = 16480 \pm 330$ МПа.

Таблица 6 – Результаты относительного изменения микротвердости образца №3

№ сектора	Мощность излучения, Вт	Плотность мощности, Вт/см ²	Скорость сканирования, м/мин.	Число проходов	$H^*_v = \langle H_v \rangle \pm \Delta H_v$, МПа	$\frac{H^*_v}{H_v}$
1	150	0,8.104	0,3	2	21940±300	1,3
2	150	0,8.104	0,6	2	18920±310	1,15
3	150	0,8.104	0,9	2	22600±290	1,37
H_v и H^*_v – микротвердость образцов до и после лазерной термообработки соответственно.						

При выбранных режимах увеличение микротвердости было максимально при скорости сканирования луча 0,9 м/мин и составило 1,37 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации были рассмотрены перспективы улучшения свойств твердосплавных композитов методом лазерного термоупрочнения. Проведен выбор оптимальных режимов лазерной термообработки поверхности композита на основе карбида вольфрама. Сравнительный анализ микротвёрдости образцов композита до и после обработки лазерным излучением показал, что при оптимальных режимах термоупрочнения микротвердость поверхности образца твердого сплава, модифицированного УДП медью, увеличивается в 2,6 раз, для образцов WC8+Al₂O₃ и WC8+Al микротвердость увеличилась в 1,34 и 1,37 раз, соответственно. Рассмотрены возможности для принятия дополнительных мер по достижению лучших показателей термоупрочнения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Геллер, Ю. А. Материаловедение: Учебное пособие для вузов / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт; под ред. А.Г. Рахштадта. – М.: Металлургия, 1989. – 454 с.
2. Материаловедение: Учеб. для вузов / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин [и др.]; Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – 3 изд., переработ. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 648 с.
3. Панов, В. С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них: Учебное пособие для вузов / В. С. Панов, А. М. Чувилин. – М.: МИСИС, 2001. – 432 с.
4. Разработка эффективных путей управления структурой и свойствами твердосплавных композитов, модифицированных наночастицами / Ю.И. Гордеев, А.К. Абкарян, А.С. Бинчуров, В.Б. Ясинский, И.В. Карпов, А.А. Лепешев, О.Л. Хасанов, Э.С. Двилис // Журнал сибирского федерального университета. серия: техника и технологии. – 2014. – С.270-289.
5. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. Пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров; под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 000 с.: ил.
6. Высокоэнергетические процессы обработки материалов (Низкотемпературная плазма. Т.18) : монография / О.П. Солоненко, А.П. Алхимов, Х. М. Рахмиянов [и др.]. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 425 с.
7. Технология лазерной обработки конструкционных и инструментальных материалов в авиадвигателестроении: учеб. пособие / Р. Р. Латыпов, Н. Г. Тергулов, А. М. Смыслов, А. В. Лобанов; под общ. ред. В. Ф. Безъязычного. – М.: Машиностроение, 2007. – 234 с.
8. Быконя, Л. А. Испытание на микротвердость: Метод указания к выполнению лабораторных работ для студентов всех специальностей / Л. А. Быконя. – Красноярск: КГТУ, 1998. – 15 с.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Базовая кафедра фотоники и лазерных технологий

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий баз.каф. ФилТ



А.Н. Втюрин

« 07 » июля 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Лазерное термоупрочнение твердосплавных композитов на основе карбида
вольфрама

16.04.01 Техническая физика

16.04.01.02 Оптическая физика и квантовая электроника

Научный руководитель



доцент,
канд. техн. наук

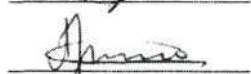
Н. Э. Лямкина

Выпускник



А. А. Шефер

Рецензент



ст.науч.сотр.,
канд. физ.-мат. наук

А. С. Крылов

Красноярск 2020